

УДК 621.95

П. Кривий, канд. техн. наук; В. Кобельник; М. Кузьмін

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## ПРО ХАРАКТЕР ЗМІНИ ПОДАЧІ ПРИ ВИХОДІ ІНСТРУМЕНТА З ТІЛА ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕСІ СВЕРДЛІННЯ НАСКРІЗНИХ ОТВОРІВ

**Резюме.** На основі міцнісних характеристик свердла, яке розглянуто як консольно-закріплений стержень, з урахуванням приведеної жорсткості механізму подач вертикально-свердильного верстата отримано різні закономірності зміни подачі при виході інструмента із тіла заготовки в процесі свердління наскрізних отворів залежно від діаметра свердла у вигляді системи рівнянь, виходячи із певних обмежень, а саме: пластичної міцності матеріалу інструменту; стійкості на поздовжній згин; міцності на кручення; міцності механізму подач вертикально-свердильних верстатів.

**Ключові слова:** математична модель, подача, свердло, міцність, пластичність, жорсткість, наскрізний отвір.

P. Kryvyy, V. Kobelnyk, M. Kuzmin

## ON THE NATURE OF FEED VARIATION IN THE TOOL EXIT FROM THE WORK PIECE BODY IN THE PROCESS OF THE THROUGH HOLES DRILLING

**Summary.** The paper deals with the investigation of feed variations regularities in the tool exit from the work piece body in the process of through holes drilling. It is stressed that the labor input of drilling depending on the production mode including single part, small batch, batch and high volume manufacturing, are respectively from 6 – 7% to 20 – 30% the total value of the machining labor input. As a result of detailed and profound analysis of home bibliography dealing with the through holes drilling process it was found that at present time there is no unanimous opinion on the feed variations character on the stage of tool exit from the work piece body.

The paper proposes to examine the drill as a console mounted rod (shank) which is hinged tilting with its free end. The rod feed is determined basing on certain restrictions: plastic strength of tool material; longitudinal bending resistance; torsion strength; strength of vertical drilling machine feed mechanism. The dependences are determined to find the ratios of the drilling axial force value and the force at which the Vickers hardness of the machining material. The dependences are also developed to calculate the feed value on the assumption of the condition of the strength ensuring of the tool material used. The design parameters of drills of different manufacturers that are regulated by Ukraine, Russian Federation, Sweden, Germany and the USA standards are analyzed. The formulae are found to calculate the length of the mounted drill console for different helical drills types and series.

More accurate mathematical model is found to determine the feed value with the given assumptions considering the drill rod console length and as an example it is illustrated by different materials of corresponding graphs.

The diagram of the feed variation depending on the drill diameter while drilling the holes in the steel with  $\sigma_s=750$  MPa is given for the high speed steel P9Φ5 taper-shank drills (tungsten content is about 9%, vanadium – 5%, carbon – 1%, chromium – 3,5 – 4%, molybdenum – 1%).

The dependences to calculate the ranges of drills for which a feed is determined considering some or other restrictions are found. It is stated that depending on the drill diameter and the vertical drilling machine

*rigidity spindle as well as the parts deformation value of feeling, the character of feed change in the tool exit from the work piece body while holes drilling can cause the feed increase, decrease or can not change it at all.*

**Key words:** *mathematic model, feed, drill, strength, plastic strength, rigidity, through hole.*

**Постановка проблеми та її актуальність.** Свердлильні роботи в загальній трудомісткості механічної обробки за даними, поданими в [1], складають 6...7% в одиничному і дрібносерійному виробництвах, 10...12% – у середньосерійному та до 20 – 30% – у масовому виробництві.

На сьогодні спостерігається тенденція, коли багато операцій, які здійснювались на розточувальних верстатах, переводять на дешевші й простіші вертикально-свердлильні верстати. Автотракторні заводи, наприклад, мають свердлильних верстатів у 6...10 разів більше, ніж розточувальних [1]. Особливо слід зазначити, що в автомобіле-тракторному виробництві широко використовуються спеціальні верстати для отримання отворів різного діаметра, в яких одночасно здійснюється процес різання свердлами різних діаметрів.

У зв'язку з цим постає проблема обґрунтування встановлення характеру зміни подачі на етапі виходу свердла із тіла заготовки з урахуванням певних конструкторських особливостей інструментів, так і жорсткісних і міцнісних характеристик інструментів та свердлильних верстатів.

Розв'язання поставленої, безперечно актуальної проблеми в даній роботі здійснено на основі конструкторсько-технологічних обмежень, а саме: пластичної міцності матеріалу інструменту; стійкості свердл як стержнів, які консольно закріплені одним кінцем, а іншим шарнірно оперті на торець заготовки; міцності свердл з умови кручення та міцності деталей механізму подач свердлильного верстата дасть змогу отримати залежності, які обґрунтовують характер зміни подачі при свердлінні наскрізних отворів, що послужить основою для створення нових конструкторсько-технологічних рішень, які реалізують отримані закономірності зміни подачі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню характеру зміни подачі при свердлінні наскрізних отворів присвячені роботи [2 – 5]. У них висвітлено результати досліджень впливу подачі на виході свердла із тіла заготовки на крутний момент, а також подано рекомендації щодо зміни величини подачі при свердлінні наскрізних отворів.

Відзначено, що в процесі свердління наскрізних отворів під дією осьового зусилля  $P_o$  виникають пружні деформації деталей механізму подач вертикально-свердлильного верстата, що призводить до накопичення потенціальної енергії, яка, в свою чергу, може спричинити до збільшення подачі при виході інструмента із тіла заготовки. В результаті згаданого при виході інструмента із тіла заготовки спостерігається значне, приблизно в 1,75 – 1,85 раза [2, 4] збільшення крутного моменту, що, в свою чергу, може бути причиною поломки свердл. Через те в процесі свердління наскрізних отворів величину подач рекомендують зменшувати на 20...25% [6], а в деяких випадках – у 1,35...1,45 раза [7] і навіть у 2 рази [8] в порівнянні зі значеннями подач, які призначають при свердлінні глухих отворів.

Проте зменшення подачі при свердлінні по всій глибині отвору призводить до збільшення шляху різання, підвищення трудомісткості операцій та інтенсивності зношування свердл і в кінцевому результаті до зниження ефективності обробки. З метою недопущення таких недоліків запропоновано ряд пристроїв [9 – 11], які

забезпечують зменшення подачі тільки на виході інструменту із тіла оброблюваної заготовки.

Разом з тим, відомий спосіб [5] і пристрій [12] для свердління отворів малого діаметра, які забезпечують на виході свердла із тіла заготовки різке збільшення подачі і за рахунок цього відбувається зрізування задирок, що утворюються.

Дослідженню вибору режимів різання при свердлінні отворів малого діаметра, а також вильоту малорозмірних сверدل на їх експлуатаційні властивості присвячені роботи [13, 14], в яких враховується втрата стійкості свердла як стержня і розглядаються при цьому різні форми прогинів сверدل діаметром 0,5 мм.

Аналіз вищезгаданих літературних джерел, в яких рекомендується зменшувати подачу при виході свердла із тіла заготовки в процесі свердління наскрізних отворів, не дає відповіді на запитання, при якому співвідношенні осьової сили різання  $P_o$  і приведеної до шпинделя жорсткості  $C_{np}$  вертикально-свердлильного верстата мало б місце різке збільшення подачі й крутного моменту при виході інструменту.

Найповніше питання обґрунтування зміни подачі на виході інструмента із тіла заготовки при наскрізному свердлінні наведено в роботі [15]. Разом з тим у цій роботі не враховано впливу на подачу такого обмеження, як пластична міцність матеріалу інструменту, не подано залежностей для визначення коефіцієнта співвідношення довжини робочої частини свердла до його діаметра, не уточнено діапазонів діаметрів сверدل, в яких забезпечувався б певний характер зміни подачі.

Окрім цього, наведений вище огляд літературних джерел показує, що на даний час на питання щодо характеру зміни подачі при виході інструменту із тіла заготовки в процесі свердління не має однозначної відповіді.

Позаяк відсутні обґрунтовані рекомендації щодо кількісних характеристик зміни подачі при згаданих вище процесах залежно як від діаметра свердла, так і приведеної жорсткості вертикально-свердлильного верстата, то обґрунтування характеру зміни подачі при виході інструмента із тіла заготовки в процесі свердління наскрізних отворів є новим кроком у розв'язанні поставленої проблеми.

**Мета роботи** – отримання математичної моделі з урахуванням прийнятих технічних обмежень, яка б обґрунтовувала характер зміни подачі при виході інструмента із тіла заготовки при наскрізному свердлінні отворів різних діаметрів.

#### **Основні завдання:**

1. Розробити математичну модель для визначення подачі при свердлінні наскрізних отворів з урахуванням міцності свердла на поздовжній згин, міцності свердла на кручення, пластичну міцність інструментального матеріалу та міцність механізму подач вертикально-свердлильного верстата.

2. Вияснити характер зміни подачі при виході свердла із тіла заготовки залежно від діаметра та приведеної жорсткості вертикально-свердлильного верстата.

3. Визначити діапазон діаметрів сверدل, у межах яких реалізується характер зміни подач.

**Виклад основного матеріалу.** Величина подачі при свердлінні в загальному випадку повинна визначатись, виходячи із певних обмежень, а саме: міцності свердла з умови кручення; міцності свердла на поздовжній згин, що може призвести до втрати його стійкості як стержня, який консольно закріплений одним кінцем, а іншим

шарнірно опертий; пластичної міцності інструменту; міцності деталей механізму подач свердлильного верстата.

Значення подачі, що регламентуються і допускаються міцністю свердла на основі [16], може бути визначене, якщо використати і перетворити відому залежність

$$S_i \leq \frac{M}{W} = \frac{C_M \cdot D^{x_M} \cdot S^{y_M}}{W} = C_S \cdot D^{x_S}, \quad (1)$$

де  $M$  і  $W$  – відповідно крутний момент різання при свердлінні, Н·м і полярний момент інерції, мм<sup>3</sup>;

$C_M$ ,  $C_S$  – коефіцієнти, які враховують вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу відповідно на величину крутного моменту та подачі;

$x_M$ ,  $y_M$  і  $x_S$  – показники степеней, які враховують вплив діаметра свердла та подачі на величину крутного моменту і величину подачі відповідно;

$D$  – діаметр свердла, мм.

Враховавши, що стійкість стержня, крім іншого, визначається довжиною його консолі, є доцільним дослідити цей параметр для свердл різних типів та різних виробництв. Проаналізувавши за даними [17] і врахувавши співвідношення величини робочої частини свердла  $l_0$  до їх діаметрів  $D$ , отримали залежності  $k$  від  $D$ , які наведено в таблиці 1, та побудували графіки залежності  $k = f(D)$  для різних типів і виробників свердл (рис. 1).

Подача свердла, що визначається із умови забезпечення стійкості свердла, а саме міцності на поздовжній згин, може бути визначена з використанням [18] за формулою

$$S_{\dot{n}0} \leq \left( \frac{P_{\dot{e}0}}{D^{x_p} \cdot C_p \cdot HB^n} \right)^{\frac{1}{y_p}} = \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{C_p \cdot \mu^2 \cdot l^2 \cdot D^{x_p} \cdot HB^n} \right)^{\frac{1}{y_p}}, \quad (2)$$

де  $C_p$  – коефіцієнт, який враховує вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу відповідно на величину осьового зусилля різання;

$x_p$ ,  $y_p$  – показники степеня, які враховують вплив діаметра свердла та подачі на величину осьового зусилля різання;

$P_{кр}$  – критична сила Ейлера, Н;

$E$  – модуль пружності матеріалу свердла, МПа;

$I_{\min}$  – мінімальний осьовий момент інерції (для свердл  $I_{\min} \approx 0.0045 \cdot D^4$ , [13, 19]), мм<sup>4</sup>;  $D$  – діаметр свердла, мм;

$HB$  – твердість оброблюваного матеріалу за Брінелем;

$\mu$  – коефіцієнт приведеної довжини для свердла, яке розглядається як стержень, який консольно закріплений одним кінцем, а іншим шарнірно опертий на торець заготовки,  $\mu=0,7$  [13];

$l$  – довжина виступаючої із свердлильного патрона (шпинделя) частина свердла

(довжина консолі)  $l = (1.15 \dots 1.2) \cdot k \cdot D - l_{ер}$ , тут  $k = \frac{l_0}{D}$ ,  $l_0$  – довжина робочої

частини свердла, мм;

$l_{ер}$  – величина врізування свердла в тіло оброблюваної заготовки, мм;

$l_{ер} = 0.5 \cdot D \cdot \operatorname{ctg} \phi$ ,

$\varphi$  – головний кут у плані.

Таблиця 1.

Залежність коефіцієнта  $k$  від  $D$  для свердл різних типів та виробників.

Країна, виробник свердл	Тип свердл	Серія	Залежність $k = f(D)$
Підприємства України та колишнього СРСР	Спиральні з циліндричним хвостовиком	Коротка	$k = -1,356 \cdot D^{0,365} + 7,514$ (3)
		Середня	$k = -1,158 \cdot D^{0,589} + 13,434$ (4)
		Довга	$k = 47,867 \cdot D^{-0,265} + 13,224$ (5)
	Спиральні з конічним хвостовиком	Загальна	$k = -36,517 \cdot D^{0,059} + 50,552$ (6)
		Подовжена	$k = 112,507 \cdot D^{-0,982} + 5,177$ (7)
		Довга	$k = 26,037 \cdot D^{-0,336} + 0,523$ (8)
	Спиральні з циліндричним хвостовиком для обробки легких сплавів	Середня	$k = -2,257 \cdot D^{0,455} + 15,203$ (9)
		Довга	$k = 39,831 \cdot D^{-0,576} + 1,497$ (10)
	Спиральні з конічним хвостовиком для обробки легких сплавів	Загальна	$k = -2,951 \cdot D^{0,337} + 15,196$ (11)
		Подовжена	$k = 112,327 \cdot D^{-0,98} + 5,134$ (12)
	Спиральні твердосплавні цільні з циліндричним хвостовиком	Коротка	$k = -1,519 \cdot D^{0,37} + 7,958$ (13)
		Середня	$k = 8,775 \cdot D^{-0,425} + 2,649$ (14)
SANDVIK Coromant, Швеція	Спиральні цільні твердосплавні з циліндричним хвостовиком	Коротка	$k = -0,186 \cdot D^{0,878} + 6,497$ (15)
GÜHRING, Німеччина			
Kennametal, США		–	$k = -14,21 \cdot D^{0,118} + 25,38$ (16)

Визначимо з умови забезпечення пластичної міцності інструментального матеріалу допустиму подачу  $S_{пл}$ , скориставшись [20] та наступними міркуваннями. Пластичну міцність характеризує коефіцієнт запасу міцності  $n_T$  і температура в зоні різання [18], який виразимо залежністю

$$n_T = \frac{H_i}{H_\varphi},$$

де  $H_i$  – твердість інструментального матеріалу в контактних шарах головної задньої поверхні свердла;

$H_\varphi$  – твердість оброблюваного матеріалу в зоні умовної площини зсуву.

Нехай твердість інструментального матеріалу за Вікерсом  $HV$  виразимо формулою, поданою в [17],

$$HV = H_i = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}, \quad (17)$$

де  $P$  – навантаження, кгс;

$d$  – довжина діагоналі відпечатка піраміди на поверхні інструментального матеріалу, мм.

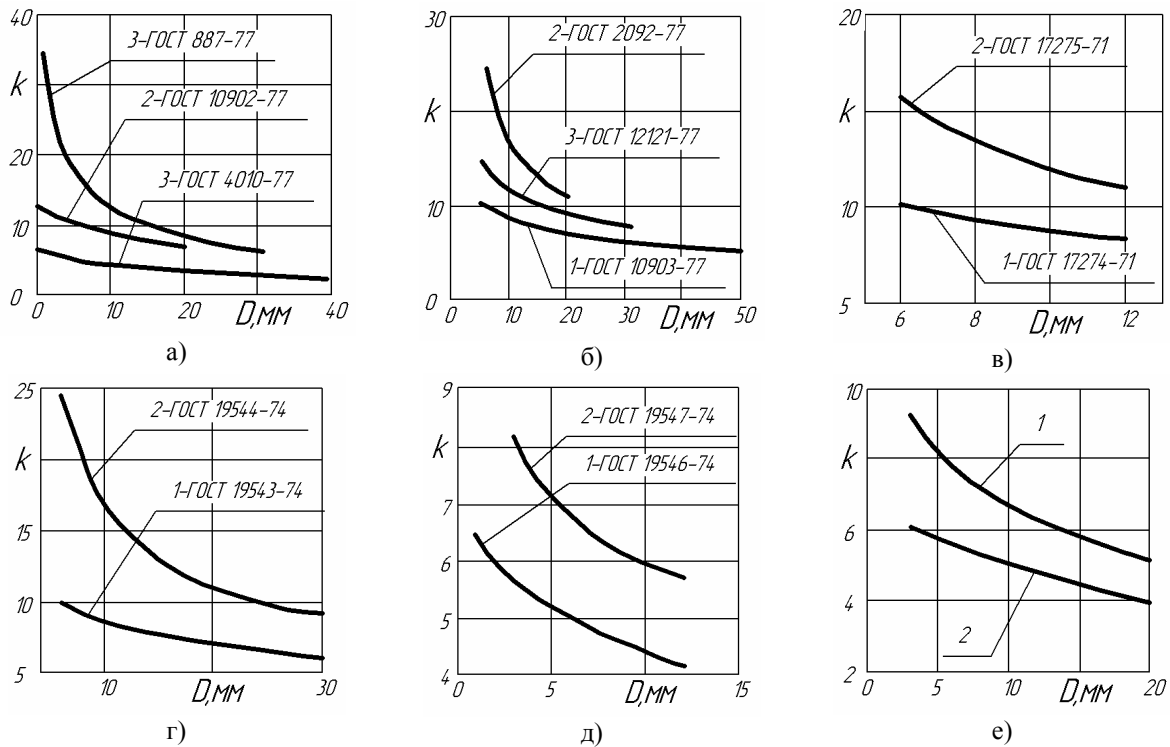


Рисунок 1. Графічні залежності  $k = f(D)$ :

а) – для свердл з циліндричним хвостовиком – 1, 2, і 3 відповідно для короткої, середньої і довгої серій; б) – для свердл з конічним хвостовиком – 1, 2 і 3 відповідно для загальної, подовженої і довгої серій; в) – для свердл з циліндричним хвостовиком для обробки легких сплавів – 1 і 2 відповідно для середньої і довгої серій; г) – для свердл з конічним хвостовиком для обробки легких сплавів – 1 і 2 відповідно для загальної і подовженої серій; д) – для свердл твердосплавних цільних з циліндричним хвостовиком – 1 і 2 відповідно для короткої і середньої серій; е) – свердла виробництва закордонних фірм: 1 – SANDVIK Coromant (Швеція) та GÜHRING (Німеччина), 2 – Kennametal (США)

Figure 1. Graph dependencies  $k=S(D)$ :

a) – for cylinder-shank drill; 1, 2, 3 – for short, middle and long types drill respectively; b) for taper-shank drill – 1, 2, 3 for general, normal and prolonged types respectively; c) for cylinder-shank drill for light alloys treatment – 1 and 2 for middle and long types; d) for taper-shank drills for light alloys treatment – 1 and 2 for general and prolonged types respectively; e) for cylinder-shank all-hard alloys drills – 1 and 2 for short and middle types respectively; f) foreign-made drills; 1 – SANDVIK Coromant (Sweden) and GÜHRING (Germany), 2 – Kennametal (USA)

Для визначення величини подачі свердла з умови забезпечення пластичної міцності скористаємося розрахунковою схемою, зображеною на рис. 2.

Прийmemo, що ширина відпечатка при проникненні перемички свердла в тіло інструментального матеріалу дорівнює  $A_1B_1=A_2B_2=b$  (рис. 2a). Сторона основи квадрата відпечатка при проникненні піраміди в тіло інструментального матеріалу при визначенні твердості за Вікерсом, врахувавши, що піраміда правильна буде  $a = \frac{d}{\sqrt{2}}$ .

Взявши до уваги те, що перемичка свердла являє собою клин [21], кут при вершині якого дорівнює  $2\varphi$ , а також те, що при навантаженні піраміди чи клина зусиллям величиною  $P$  і прийнявши, що площі їх бокових граней будуть рівні, отримаємо

$$b = 0.734 \cdot d \cdot \sqrt{\sin \varphi}.$$

У подальшому визначимо довжину сторін  $A_1O_1$  і  $A_2O_2$  з трикутників  $\Delta A_1O_1B_1$  і  $\Delta A_2O_2B_2$

$$A_1O_1 = A_2O_2 = \frac{0.367 \cdot d}{\sqrt{\sin \varphi}}.$$

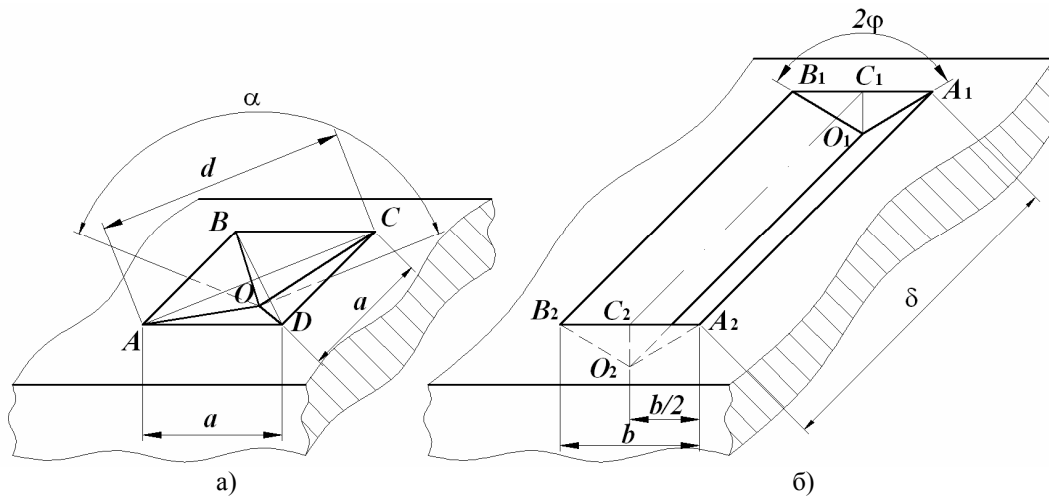


Рисунок 2. Розрахункова схема для визначення площі нахилених граней відпечатка перемички свердла, поданої у вигляді клина: а – схематичне зображення відпечатка піраміди при контролі твердості за Вікерсом; б – схема відпечатка перемички свердла на поверхні різання

Figure 2. Calculation scheme for finding the drill dam inclined edge print presented as a wedge:

- a) scheme appearance of the pyramid print under the Vicker's hardness control;  
b) print scheme of the drill dam on the cutting surface

Знехтувавши нормальними напруженнями, які діють на поверхнях, що подані  $\Delta A_1O_1B_1$  і  $\Delta A_2O_2B_2$  [21], які паралельні напрямку навантаження  $P$ , і, виразивши ширину перемички  $\delta = O_1O_2$  через діаметр свердла  $D$ , тобто  $\delta = 0.2D$  [22], отримаємо сумарну площу граней  $A_1O_1O_2A_2$  і  $B_1O_1O_2B_2$  у вигляді

$$S_a = \frac{0.147 \cdot D \cdot d}{\sqrt{\sin \varphi}}. \quad (18)$$

Використавши (17), (18) і прийнявши  $n_T = 1$  [20] та виразивши твердість інструментального матеріалу через навантаження  $P_{ol}$ , що діє від перемички свердла на площу  $S_\delta$ , отримаємо

$$P_{ol} = \frac{0.272 \cdot P \cdot D}{d \cdot \sqrt{\sin \varphi}}. \quad (19)$$

З іншої сторони навантаження  $P_{ol}$  повинно дорівнювати осьовій силі від перемички свердла, що виникає в процесі свердління, тобто  $P_{ol} = P_i = 0.6P_o$  [22], тут  $P_o$  – осьове зусилля при свердлінні.

Скориставшись [16] та виразом (19), отримаємо

$$\frac{0.453 \cdot P \cdot D}{d \cdot \sin \varphi} = C_p \cdot D^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot HB^n, \quad (20)$$

звідки

$$S_{i\bar{e}} \leq \left( \frac{0.453 \cdot P \cdot D}{C_p \cdot D^{x_p} \cdot HB^n \cdot d \cdot \sqrt{\sin \varphi}} \right)^{\frac{1}{y_p}}. \quad (21)$$

Для сталей і чавунів, врахувавши [16], згідно з чим  $x_p=1$ , вираз (21) набуде вигляду

$$S_{i\bar{e}} \leq \left( \frac{0.453 \cdot P}{\tilde{N}_\phi \cdot HB^n \cdot d \cdot \sqrt{\sin \varphi}} \right)^{\frac{1}{y_p}}. \quad (22)$$

Із виразу (22) та даних, поданих у [16, 17] виходить, що при свердлінні отворів у сталях та чавунах з умови забезпечення пластичної міцності інструментального матеріалу діаметр свердла не впливає на максимально допустиме значення  $S_{nl}$ .

Для свердл великих діаметрів обмежувальними параметрами значень подач є допустиме зусилля механізму подач –  $P_{mn}$ . У цьому випадку, використавши відоме обмеження  $P_o \leq P_{mn}$ , отримаємо

$$C_p \cdot D^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot HB^n \leq P_{i\bar{r}},$$

звідки

$$S_{mn} \leq \left( \frac{C_1}{D^{x_p}} \right)^{\frac{1}{y_p}}, \quad (23)$$

де  $C_1 = \left( \frac{P_{mn}}{C_p \cdot HB^n} \right)$  – для конкретних умов обробки величина постійна, тобто  $C_1 = const$ .

Аналіз отриманих залежностей (1), (2), (21) і (23) показує, що подачі, які визначаються з умов забезпечення вищевказаних технічних обмежень, є функціями діаметрів. Тому можна зробити припущення, що при одних значеннях діаметрів свердл подача буде лімітуватись їх стійкістю з умови міцності на поздовжній згин, при інших — їх міцністю на кручення, або міцністю деталей механізму подач верстата, чи пластичною міцністю матеріалу інструменту.

Для визначення інтервалів діаметрів свердл, при яких подача лімітується за тим чи іншим обмеженням, виконаємо наступні дії.

Поділивши (1) на (2) та спростивши, отримаємо

$$\frac{S_i}{S_{\bar{n}\phi}} = C_s \cdot \left( \frac{C_p \cdot HB^n \cdot \mu^2 \cdot l^2}{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}} \right)^y \cdot D^z, \quad (24)$$

тут  $y = \frac{1}{y_p}$ ,  $z = x_s + y$ .

У випадку, коли подача лімітується міцністю свердл на поздовжній згин, тобто  $S_{\bar{n}\phi} < S_i$  і  $\frac{S_i}{S_{\bar{n}\phi}} > 1$ , значення діаметрів свердл будемо визначати із залежності

$$D_{\bar{n}\phi} < \left( \frac{1}{C_s} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{C_p \cdot HB^n \cdot \mu^2 \cdot l^2} \right)^y \right)^{\frac{1}{z}}. \quad (25)$$



Якщо подача свердл лімітується з умови забезпечення міцності на кручення, тоді  $S_{cm} > S_m$  і  $\frac{S_m}{S_{cm}} < 1$ , а значення діаметрів свердл визначимо із формули

$$D_i > \left( \frac{1}{C_s} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{C_p \cdot HB^n \cdot \mu^2 \cdot l^2} \right)^y \right)^{\frac{1}{z}}. \quad (26)$$

При умові, якщо  $S_{cm} = S_m$  і  $\frac{S_m}{S_{cm}} = 1$  значення діаметрів свердл будуть обмежуватись одночасно як його міцністю на кручення, так і його стійкістю на поздовжній згин як стержня, тобто

$$D_{\dot{\pi}o} = D_i = D_1 = \left( \frac{1}{C_s} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{C_p \cdot HB^n \cdot \mu^2 \cdot l^2} \right)^y \right)^{\frac{1}{z}}. \quad (27)$$

Для свердл великих діаметрів, коли технічним обмеженням є міцність деталей механізму подач верстата, значення діаметрів свердл визначимо із умови

$$\frac{S_{mn}}{S_m} > 1. \quad (28)$$

Підставивши у (28) значення подач з (1), (23) і виконавши відповідні дії та спростивши, отримаємо

$$D_{ii} \geq C_2^q, \text{ де } C_2 = \frac{C_1^y}{C_s}, \quad q = x_s + x_p + y_p. \quad (29)$$

Таким чином на всьому діапазоні діаметрів свердл значення подач визначатимемо із нижче поданої математичної моделі

$$S = \phi(D) = \begin{cases} \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{C_p \cdot D^{x_p} \cdot HB^n \cdot \mu^2 \cdot l^2} \right)^y, & 0 < D \leq \left( \frac{1}{C_s} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{C_p \cdot HB^n \cdot \mu^2 \cdot l^2} \right)^y \right)^{\frac{1}{z}} \\ C_s \cdot D^{x_s}, & \left( \frac{1}{C_s} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{C_p \cdot HB^n \cdot \mu^2 \cdot l^2} \right)^y \right)^{\frac{1}{z}} \leq D \leq C_2^q \\ \left( \frac{0.4372 \cdot P \cdot D}{C_p \cdot D^{x_p} \cdot HB^n \cdot d \cdot \sin \varphi} \right)^y, & 0 < D \leq D_{\max} \\ \left( \frac{C_1}{D^{x_p}} \right)^y, & D \geq C_2^q \end{cases}. \quad (30)$$

Аналіз виразу (30) показує, що при малих діаметрах свердл обмежувальною умовою величини подачі є міцність інструмента на поздовжній згин і тільки починаючи з певних діаметрів лімітуючими параметрами стають міцність свердл на кручення, пластична міцність інструментального матеріалу свердл та деталей механізму подач верстата.

Як приклад, на рис. 3 наведено графіки залежності подач від діаметрів свердл, визначених за умовами обмежень, обумовлених в (30) для оброблюваних сталей з

$\sigma_s=1000$  МПа і  $\sigma_s=750$  МПа та сірих чавунів з  $HB\leq 170$  із використанням даних, наведених у [16].

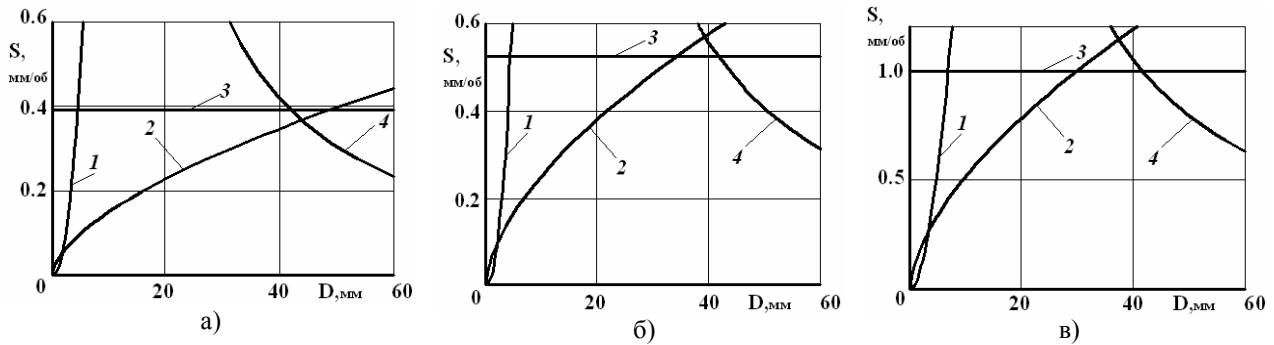


Рисунок 3. Графіки залежності подачі від діаметрів свердл, побудованих за обмеженнями:

1 – міцності свердл на поздовжній згин; 2 – міцності свердл на кручення; 3 – пластичної міцності інструментального матеріалу; 4 – міцності деталей механізму подачі верстата; а – для сталі з  $\sigma_s=1000$  МПа; б – для сталі з  $\sigma_s=750$  МПа; в – для чавунів з  $HB\leq 170$

Figure 3. Dependence graphs of feed from the diameters of drills built according to limits:

1 – drill longitudinal bending strength; 2 – drill torsion strength; 3 – plastic strength of tool material; 4 – drilling machine feed mechanism parts strength; а) for steel with  $\sigma_s = 1000$  МПа; б) for with  $\sigma_s = 750$  МПа; в) for cast irons with  $HB\leq 170$

У загальному випадку на підставі (30) характер зміни подачі залежно від діаметра свердла виразиться діаграмою зміни подачі, наведеною на рис. 4.

Значення осьового зусилля  $P_o$  при свердлінні свердлами різних діаметрів з урахуванням (30) визначимо за формулою

$$P_o = C_p \cdot D^{x_p} \cdot [\phi(D)]^{y_p} \quad (31)$$

Так як величина діаметрів свердл в інтервалі  $0 < D \leq D_1$  (див. рис. 3 та 4) невелика,  $D_1 \approx 2,5 \dots 3$  мм, то величина  $P_o$  у цьому випадку буде незначною. Врахувавши те, що в цьому інтервалі діаметрів свердл подача призначається з умови втрати стійкості свердла як стержня, будемо вважати свердла абсолютно жорсткими у поздовжньому напрямку. Величина осьового прискореного переміщення шпинделя « $\Delta_{ш}$ » при виході свердла із тіла заготовки, як результат пружного роздеформовування деталей механізму подачі верстата, можемо знайти із залежності

$$\Delta_{ш} = \frac{P_o}{C_{ш}} = \frac{C_p \cdot D^{x_p} \cdot [\phi(D)]^{y_p}}{C_{ш}} \quad (32)$$

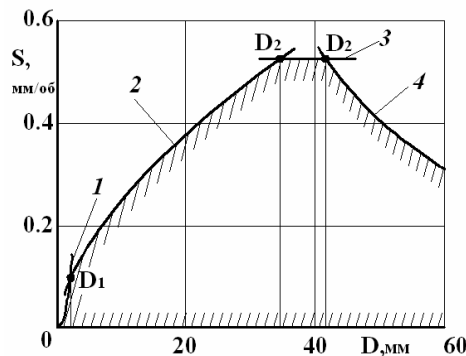


Рисунок 4. Діаграма зміни подачі залежно від діаметра свердла при свердлінні отворів у сталі  $\sigma_s=750$  МПа для свердл з конічним хвостовиком довгої серії із матеріалу P9Ф5

Figure 4. Diagram of change depending on the drill diameter while drilling holes in steel  $\sigma_s = 750$  МПа for taper-shank drills of general type made of P9Ф5

На основі вищевикладеного впливає, що процес виходу свердла із тіла заготовки при наскрізному свердлінні може мати різний характер.

Для свердл, діаметри яких заходяться в інтервалі

$$0 < D \leq \left( \frac{1}{C_s} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{C_p \cdot HB^n \cdot \mu^2 \cdot l^2} \right)^y \right)^{\frac{1}{z}}, \text{ внаслідок малих значень подач і осьових зусиль } P_o,$$

величина приведеної до шпинделя пружної деформації деталей механізму подач верстата незначна, становить порівняно з подачею величину другого порядку [23]. Тому при виході свердла із тіла заготовки збільшенням подачі за рахунок наявності незначних пружних деформацій деталей механізму подач верстата не можна знехтувати і вважати її постійною. В момент виходу свердла із тіла заготовки при наскрізному свердлінні шар металу, який знаходиться під вершиною інструмента, починає випучуватись і розривається, утворюючи при цьому тріщини і своєрідні консольно-закріплені пелюстки, які під дією конічної частини свердла (різальна частина) та руху подачі утворюють задирки.

Якщо врахувати, що для свердл вказаних малих діаметрів величини подач встановлюються, виходячи із умови міцності на поздовжній згин у границях  $S=0,005\dots0,05$  мм/об з певним запасом міцності на кручення (див. рис. 3), а також і те, що при заглибленні свердла в процесі свердління коефіцієнт приведеної довжини  $\mu$  зменшується, то на виході свердла лімітуючим параметром стає його міцність на кручення. Таким чином, отримуємо можливість збільшувати подачу при виході свердла із тіла заготовки на величину  $\Delta S = S_i - S_{\tilde{n}o}$  і зрізувати при цьому допоміжними різальними лезами досить тонкі, через малі значення подач, задирки. Саме цим пояснюється технічне рішення, наведене в [5] і [12].

Для свердл, діаметри яких визначають з умови [26] і подача лімітується їх міцністю на кручення, характер зміни подачі на виході інструменту із тіла заготовки в основному визначається жорсткістю верстата. Якщо діаметри свердл незначно

відрізняються від величини  $\left( \frac{1}{C_s} \cdot \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{C_p \cdot HB^n \cdot \mu^2 \cdot l^2} \right)^y \right)^{\frac{1}{z}}$ , а осьова сила  $P_o$ , яка виникає

при цих діаметрах, викликає деформації механізму подач верстата  $\Delta_{mn}=(0,1\dots0,3)S_m$ , то практично на виході свердла подачу можна залишати незмінною. Таке положення підтверджено практикою. На ВАТ «Тернопільський комбайновий завод» при свердлінні наскрізних отворів діаметром  $D = 6$  мм у конструкційній сталі (сталь 40 ГОСТ 1050 – 80) на вертикально-свердлильному верстаті моделі 2Н135 при частоті обертання шпинделя  $n = 1400$  об/хв і подачі  $S = 0,14$  мм/об, свердлами із швидкорізальної сталі Р9Ф5 поломок свердл при виході їх із тіла оброблюваних заготовок не спостерігалось.

Для випадку, коли подача визначається за міцністю свердла на кручення і при виході інструменту із тіла заготовки подачу не змінюють, граничні діаметри свердл визначаються, із наступних міркувань. Використавши (30) і (31), можна подати величину пружних деформацій, приведених до шпинделя верстата виразом

$$\Delta_{mn} = \frac{P_o}{C_{np}} = \frac{C_p \cdot D^{x_p} \cdot [f(D)]^{y_p}}{C_{np}}, \quad (33)$$

але так як  $S_m = C_S \cdot D^{x_S}$ , тоді

$$k_o \cdot C_S \cdot D^{x_S} \cdot C_{np} = C_p \cdot D^{x_p} \cdot C_S^{y_p} \cdot D^{x_S \cdot y_p}. \quad (34)$$

Розв'язавши (34) відносно  $D$  при максимальному значенні  $k_o$ , отримаємо

$$D \leq \left( \frac{k_{o\max} \cdot C_S^{1-y_p} \cdot C_{np}}{C_p} \right)^{\frac{1}{x_p + x_S \cdot y_p - x_S}}. \quad (35)$$

Для свердл, діаметри яких більші значень, поданих у формулі (35), виникає необхідність при виході інструмента зменшувати подачу. Значення подачі згідно із рекомендаціями [24] повинно зменшуватися, починаючи із відстані  $h_p$  від нижнього торця оброблюваної деталі, яке дорівнює  $h_p = \Delta_{mn} + \Delta_i$ . Тут  $\Delta_{mn}$  – величина приведеної до шпинделя деформації деталей механізму подач верстата при певних конкретних умовах різання: діаметрі свердла, подачі, моделі вертикально-свердильного верстата, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу та матеріалу інструменту;  $\Delta_i$  – відстань від нижнього торця заготовки до зони початку пружного випучування оброблюваного матеріалу при свердлінні наскрізних отворів. У літературі [24] подана формула  $\Delta_i = (0,15 \dots 0,5)D$  і рекомендації щодо вибору значень  $\Delta_i$  залежно від твердості оброблюваних матеріалів. Необхідно відзначити, що рекомендована формула не враховує впливу подачі, а також ступеневої залежності  $D$  на величину  $\Delta_i$ . Ми здійснили спробу [25] подати  $\Delta_i$  як величину, що залежить як від діаметра свердла, так і від подачі, провели експериментальні дослідження та отримали рівняння регресії другого порядку.

На рис. 5 схематично зображено варіанти зміни характеру подачі на виході інструменту із тіла заготовки при свердлінні наскрізних отворів за запропонованими технічними обмеженнями.

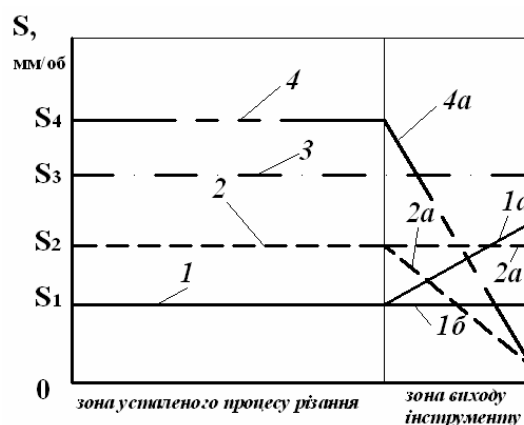


Рисунок 5. Схематичне зображення варіантів зміни характеру подачі на виході інструменту із тіла заготовки при свердлінні наскрізних отворів за різними технічними обмеженнями: 1 – міцності свердл на поздовжній згин; 2 – міцності свердл на кручення; 3 – пластичної міцності інструментального матеріалу; 4 – міцності деталей механізму подач верстата

Figure 5. Schematic image of feeding type variation at exit point of the tool from the body of the work piece by drilling through holes with various technical limitation: 1 – drill longitudinal bending strength; 2 – drill torsion strength; 3 – plastic strength of tool material; 4 – drilling machine feed mechanism parts strength

**Висновки.** Вперше розроблено математичну модель для визначення подачі при свердлінні наскрізних отворів, яка враховує міцність свердла на поздовжній згин, міцність свердла на кручення, пластичну міцність інструментального матеріалу та міцність механізму подач вертикально-свердильного верстата. Встановлено, що залежно від діаметра свердла та приведеної до шпинделя жорсткості механізму подач вертикально-свердильного верстата на виході інструмента із тіла заготовки може мати місце різний характер зміни подач, а саме: збільшення; постійність; зменшення. На основі розробленої математичної моделі отримано методику визначення діапазонів діаметрів свердл, у межах яких реалізується той чи інший характер зміни подач.

**Conclusions.** For the first time mathematical model to find the feed value while drilling of the through holes, which takes into account the rod longitudinal bending resistance, torsion strength, tool plastic strength and feed mechanism strength of the drilling machine, has been developed. It was found that depending on the drill diameter and the vertical drilling machine rigidity spindle in the tool exit from work piece body the feed change can be of different character: increase, decrease or stable. Basing on the developed mathematical model the method for finding the drill diameter range within which the character of the feed character of the feed changes is realized, has been obtained.

У **перспективі** отримані в статті результати можуть бути використані для визначення економічної ефективності при свердлінні наскрізних отворів для певних співвідношень діаметрів свердл і приведених жорсткостей вертикально-свердильних верстатів.

### Список використаної літератури

1. Технология машиностроения [Текст]; под общей редакцией проф. Картавова С. А. – К.: Техника, 1965. – 528 с.
2. Зеленцов, В.В. Влияние жесткости настольно-сверлильных станков на точность обработки отверстий [Текст] / В.В. Зеленцов // Металлорежущие станки. – К.: Техника, 1978. – №6. – С. 50 – 54.
3. Прогрессивные технологические процессы в автостроении: Механическая обработка, сборка [Текст]; под ред. проф. С.М. Степашкина. – М.: Машиностроение, 1980. – 320 с.
4. Ertunc, H.M., Loparo K.A. A Decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in Drilling / H.M. Ertunc, K.A. Loparo // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, vol.41. – p. 1347 – 1362.
5. Пат. 55 – 162, Япония. Способ и устройство для сверления отверстий малого диаметра [Текст]; 1980.
6. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Часть I. Токарные, карусельные, токарно-револьверные, алмазно-розточные, сверлильные, строгальные, долбежные и фрезерные станки [Текст] Изд. 2-е. – М.: Машиностроение, 1974. – 406 с.
7. Вульф, А.М. Резание металлов [Текст] / А.М. Вульф. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1973. – 320 с.
8. Гуревич, Я.Л. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник [Текст] / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
9. А.с. 831411 СССР, МКИ В23 В47/00. Автоматическое сверлильное устройство [Текст] / Нагорняк С.Г., Кривый П.Д. (СССР). – №2696642/25-08; заявлено 13.12.78; опубл. 23.05.81, Бюл. № 19.
10. А.с. 709274 СССР, МКИ В23 В47/00. Устройство для сверления [Текст] / Нагорняк С.Г. (СССР). – № 2615202/25-08; заявлено 11.05.78; опубл. 15.01.1980, Бюл. №2.
11. Пат. 33445 Україна: МПК В23 В47/00. Механізм подач свердильного верстату [Текст] / Кривий П.Д., Кобельник В.Р., Кузьмін М.І.; заявник та патентовласник Терн. нац. техн. універ. ім. І. Пулюя. – №u200801364; заявл. 04.02.2008; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 8.
12. А.с. 975238 СССР, МКИ В23 В47/00. Устройство для сверления отверстий малого диаметра [Текст] / М.И. Кузьмин, П.Д. Кривый, В.Н. Сопрончук (СССР). – № 3326065/25-08; заявл. 07.08.81; опубл. 28.11.82, Бюл. № 43.
13. Гарина, Т.И. Влияние вылета мелкогабаритных сверл на их эксплуатационные свойства [Текст] / Т.И. Горина, А.К. Синельщиков // Станки и инструмент – 1972. – №1. – С. 32 – 34.

14. Гарина, Т.И. Выбор режимов резания при сверлении отверстий малых размеров [Текст] / Т.И. Гарина, А.К. Синельщиков // Станки и инструмент. – 1971. – №2. – С. 31 – 32.
15. Кривий, П.Д. К обоснованию изменения подачи на выходе инструмента при сверлении сквозных отверстий [Текст] / П.Д. Кривий, С.Г. Нагорняк, Н.И. Кузьмин. – М., 1986. – 19 с.
16. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 [Текст]; под ред. А. Н. Малова. – М.: Госнаучтехиздат машиностроительной лит-ры, 1959. – 584 с.
17. Справочник металлиста. В 5-и т. Т. 3 [Текст]; под ред. А. Н. Малова. – М.: Машиностроение, 1977. – 748 с.
18. Батанели, А.И. Прочность и надежность режущего инструмента [Текст] / А.И. Батанели. – Тбилиси: Сабчота Сакартвелд, 1973. – 304 с.
19. Пономарев, С.Д. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 3 [Текст] / С.Д. Пономарев. – М.: Машгиз, 1969. – 1118 с.
20. Филипов, Г.В. Режущий инструмент [Текст] / Г.В. Филипов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1981. – 392 с.
21. Воронцов, А.Л. Разработка новой теории резания. Состояние вопроса [Текст] / А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения. – 2008. – №2. – С. 56 – 66.
22. Филоненко, С.Н. Резание металлов [Текст] / С.Н. Филоненко. – К.: Выща школа, 1969. – 260 с.
23. Кобельник, В.Р. Жорсткість вертикально-свердильних верстатів [Текст] / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // Вісник ЖДТУ (технічні науки). – Житомир. – Вип. I (40). – 2007. – С. 34 – 40.
24. Нагорняк, С.Г. Синтез инструментально-станочной оснастки на основе анализа кинематики лезвийной обработки [Текст]: автореф. докт. дисерт: 05.03.01 / С.Г. Нагорняк. – К. 1991. – 37 с.
25. Кривий, П.Д. Величина пружно-пластичної зони при виході інструмента в процесі наскрізного свердління на основі ортогонального композиційного планування [Текст] / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті”. – Херсон, ХДМА. – 2012. – С. 145 – 146.

*Отримано 08.11.2012*